

探讨钢丝绳在悬索桥上的应用

覃巍巍 郑国坤 王瀚德 石伟

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

摘要: 钢丝绳逐渐在人行悬索桥上广泛应用,但由于钢丝绳相对平行钢丝索股的弹性模量偏小,给设计及施工带来一系列的问题,本文结合南平九峰索桥的实际应用,分别介绍了吊杆、主缆索股、索夹和索鞍的设计思路及注意事项。并结合该桥的施工方法和步骤做了进一步的说明,对类似悬索桥的设计及施工具有一定的参考意义。

关键词: 钢丝绳 悬索桥 设计 施工

1 工程概述

南平九峰索桥位于南平市区,跨越沙溪河,是连接南平市区和九峰山公园的人行悬索桥。桥梁全长333.37m,桥面净宽3.85m,主跨长200m,矢高20m,矢跨比为1/10(见图1:南平九峰索桥布置图)。每根主缆由19根 $\phi 33$ 高强钢丝绳组成,全桥共38根;吊杆采用单根 $\phi 33$ 高强钢丝绳,抗风索采用2根 $\phi 33$ 高强钢丝绳组成,共4根。该桥始建于1983年5月,并于1984年9月竣工通行,至今已使用了二十六年有余。由于受到当时条件的制约,购买不到防腐性能较好、强度较高的钢丝绳,其关键部位之一——主缆、吊杆和抗风索成为本桥最为薄弱的部件,其磨损程度相当严重,尤其是吊杆与抗风索部件,经历了二十余年的风风雨雨,特别是受到酸雨的侵蚀吊杆因腐蚀而断面颈缩,存在严重的病害,已成为不容忽视的安全隐患。

基于上述原因,需对南平九峰索桥的主缆、

吊杆和抗风索等进行更换。其它关键部位与部件,如锚碇、桥塔、桥面系的加劲梁(包括横梁、纵梁、斜撑等),以及桥面板、栏杆、索鞍等质量是良好的,根据实际状况充分利用现有的结构体系和结构部件,尽可能降低工程造价,通过加固维修后使本桥工程成为一座“新桥”。

2 主缆的设计

主缆索股采用钢丝绳两端热铸锚头结构,通过拉杆与地锚连接。根据国内钢丝绳的产品性能,其弹性模量通常在120000MPa左右,相比平行钢丝拉索的弹性模量195000MPa偏小较多。该桥边跨索长为74m,成桥后的边跨索的伸长量为247mm,再考虑该桥的桥塔宽度较小为1.4m,在空缆状态下不能仅靠索鞍的偏移来平衡主跨、边跨的水平力,因此该桥须采用拉杆连杆,使其具有较大的调节量,本桥拉杆的调节量为 ± 500 mm,能满足空缆状态下的索鞍两边主缆水平力的平衡。主缆索股的结构型式如图2所示。

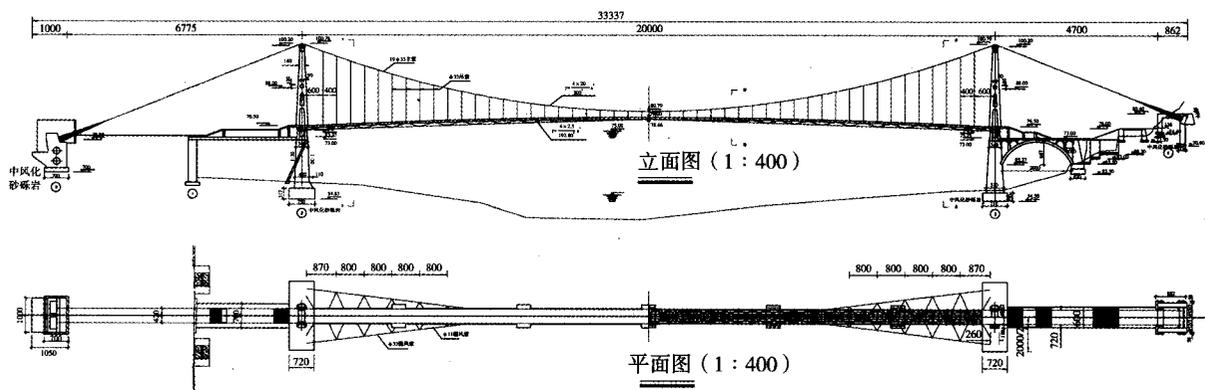
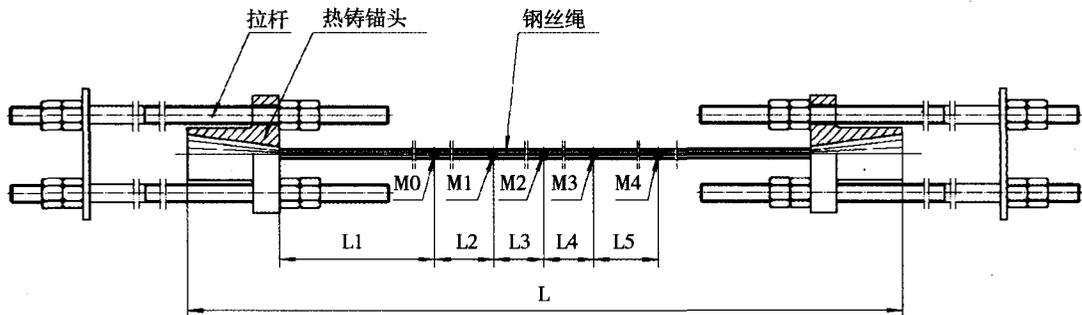


图1 南平九峰索桥布置图



M0、M4-散索套散索点标记位置；M1、M3-主缆鞍处标记点；M2-中跨跨中处标记点；

图2 主缆索股结构图

主缆设计强度校核，主要考虑该桥在恒载和活载的作用下，主缆最大受力处安全系数。悬索桥主缆的受力与其每个截面的水平受力是相等的，那么在索鞍处的受力为主缆最大受力。另外考虑到主缆采用钢丝绳结构，其弹性模量较小，受力伸长量变化较大，在计算主缆无应力长度，应充分的考虑。根据工程的实际情况，本桥为人行悬索桥且主缆及吊杆的调节量较大，可按抛物线形计算主缆线形及吊杆的长度。其计算如下：

(1) 恒载计算

全部恒载（半桥） $\Sigma g=7.1449\text{kN/m}$

恒载作用下主缆水平拉力：

$$H_g = \frac{gl_l^2}{8f_l} = 1786.225\text{kN}$$

(2) 活载内力计算：桥面活载按均布人群考虑（ 3.5kN/m^2 ），并考虑动载增大系数1.2，人群作用下得力 $P=1.2 \times 3.5 \times 3.85/2=8.085\text{kN/m}$

人群作用下主缆的水平拉力：

$$H_p = \frac{Pl_l^2}{8f_l} = 2021.25\text{kN}$$

主缆总水平拉力： $H=3807.475\text{kN}$

(3) 主缆在索鞍处最大内力：

$$T_{g+p} = \frac{(g+p)l}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{l_l}{4f_l}\right)^2} = 4100.776\text{kN} \quad (1)$$

(4) 索股的强度验算

主缆采用19根 $\phi 33$ 钢丝绳，抗拉强度 1.6kN/mm^2 ，钢丝绳总断面积： 475.24mm^2 ，换算系数： $0.85^{[1]}$

钢丝绳破断拉力 $=1600 \times 475.24 \times 0.85=646.33\text{kN}$

安全系数 $K=(19 \times 646.33)/4100.776=2.995$

符合《公路悬索桥设计规范》安全系数大于2.5的要求。^[2]

(5) 荷载作用下主缆弹性伸长

A、人群满布时弹性伸长： $\Delta S_{ep}=0.363\text{m}$

B、恒载作用下弹性伸长： $\Delta S_{eg}=0.320\text{m}$

(6) 主缆长度计算

索鞍间主缆长度： $S=l_0\left(1 + \frac{8}{3}n^2 - \frac{32}{5}n^4\right)^{[1]}$

其中： $n=f_0/l_0$

计算结果： $S=205.205\text{m}$

3 吊杆的设计

该桥吊杆的结构同样采用钢丝绳索体结构，加上主缆也采用钢丝绳索体，为保证成桥后梁标高符合设计要求，吊杆的本身所具有的调节量要求比较大，因此吊杆采用类似主缆锚头拉杆连接结构（见图3所示）。

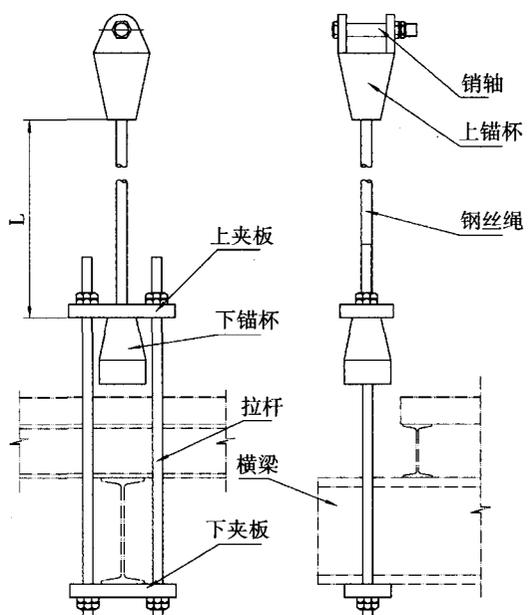


图3 吊杆结构图

吊杆是悬索桥的主要受力部件,是桥梁安全生命线。由于此桥连接结构件较多,因此需对吊杆各个连接部件进行受力分析,以确保桥梁的安全。具体设计计算如下:

(1) 吊杆承受的恒载内力

桥面系恒载为: $\Sigma g=7.1449\text{kN/m}$ (半桥), 则半桥总恒载:

$7.1449 \times 192.8=1374.54\text{kN}$, 每根吊杆承受的荷载按相同考虑, 则每根吊杆承受的恒载为:
 $R_g=1374.54/48=28.70\text{kN}$

(2) 吊杆承受的活载内力

按最不利情况考虑, 即每个单元是独立的, 单元上得活载由四根吊杆全部承受, 则:

$$R_p=3.5 \times 3.85 \times 8/4=26.95\text{kN}$$

吊杆承受的恒载和活载的总内力:
 $R=R_g+R_p=55.65=Q$

(3) 吊杆及夹板计算

1) 吊杆采用 $\phi 33$ 钢丝绳, 抗拉强度 1.6kN/mm^2 , 钢丝绳总断面积: 475.24mm^2 , 在恒载、活载作用下产生的拉应力:

$$R/S=117.10\text{MPa} < [\sigma]=1600\text{MPa}$$

考虑到吊杆部份容易腐蚀且为重要受力部件, 安全系数可以适当取大些。

2) 下吊杆采用 $2 \times \phi 30$ 螺杆, 螺纹深度 $h=3.5\text{mm}$, 以螺杆最小净截面积验算实际应力:

$$\sigma = \frac{Q}{F_j} = \frac{Q}{2 \times \frac{\pi}{4} (d-h)^2} = 32.53\text{MPa} < [\sigma]=140\text{MPa}$$

3) 夹板的受力主要考虑其弯曲应力, 材料采用 Q345:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{Q \times L}{2 \times \frac{1}{6} \times B \times h^2} = 105\text{MPa} < [\sigma]=190\text{MPa}$$

4) 索夹连接构件的验算

A、上套筒强度验算

上套筒采用 45 号铸钢, $[\sigma]=170\text{MPa}$, $[\tau]=190\text{MPa}$ [1]

套筒吊耳插销处中心截面拉应力验算:

$$\sigma = \frac{Q/2}{F} = 1.63\text{MPa} < [\sigma]=170\text{MPa}$$

B、钢销验算:

$$\tau = \frac{Q/2}{F} = 22.14\text{MPa} < [\tau]=100\text{MPa}$$

C、钢销对吊耳的挤压应力:

$$\sigma = \frac{Q/2}{F} = 55.65\text{MPa} < [\sigma]=255\text{MPa}$$

$[\sigma]=255\text{MPa}$ 为容许挤压应力 (查《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》)。

D、由于销轴较长, 还需考虑钢销受弯曲应力:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{F}{2} \frac{t_2}{2}}{\frac{\pi D^3}{32}} = \frac{8Ft_2}{\pi D^3} = 321\text{MPa}$$

F —拉力

t_2 —叉耳槽宽

D —销轴直径

此计算公式为保守的计算, 由于销连接形式具有接触受力的特性, 若不考虑这种特性, 按现行设计思路将会夸大销轴受力的不利情况, 因此销轴弯曲应力等于该公式计算值乘以系数 β 进行折减。通过参考 Winkler 弹性基础模型的假定, 建立的一种新的简化计算模型, 计算出 $\beta=0.62177$

轴的弯曲应力 $=\beta \times \sigma = 199\text{MPa} \leq [\sigma] = 212\text{MPa}$ [3]

4 索夹的设计

由于主缆采用 19 根钢丝绳组成, 其截面为正六边形结构, 为使索夹夹持主缆的空隙率最小, 因此采用六边形索夹 (如图 4 所示)。由于六边形索夹的结构相比圆形截面的索夹结构, 其受力更为复杂, 且受螺栓的弯矩较大, 因此在设计该索夹类型结构时, 要充分考虑以下两点:

1、其索夹的抗滑安全系数应比常规的索夹要大; 2、对于索夹螺栓的选择, 不宜考虑高强度螺栓。

根据本桥的具体情况, 选择的螺栓为普通螺栓, 强度为 4.8 级。

根据吊杆的最大受力, 分析近索鞍处所需索夹抗滑力为 3.1t, 当螺栓达到预紧力 5.9t, 再考虑

构,使得施工产生了诸多困难,本文结合溱水路大桥实际施工,介绍了上部结构的一些主要施工技术,为今后类似桥梁的建议提供参考。

参考文献

- [1] 张灵芝,蔡汝一. 30m跨连续箱梁满堂脚手架施工技术[J]. 重庆电子工程职业学院学报, 2011(02): 161
- [2] 刘芳,艾军,张建东等. 多工作面施工方案在某波形钢腹板箱梁桥中的应用[J]. 施工技术, 2011(12):46-49

- [3] 杨林杰. 浅谈波形钢腹板预应力混凝土箱梁的施工[J]. 中国水运. 2010(11):225-226
- [4] 邓凤学. 独塔无背索轻斜拉桥主塔施工技术[J]. 广州大学学报(自然科学版)2008(4):88
- [5] 卢鹏. 无背索斜拉桥锚垫板、索道管的定位测量[J]. 桥梁建设2007(增刊2):134-135
- [6] 汤意. 无背索波形钢腹板部分斜拉桥的整体力学性能分析[J]. 公路工程2011(8):42-43
- [7] 王博木,王玉杰,任大龙. 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的应用与发展[J]. 江苏技术师范学院学报2011(4):48

(上接第22页)

(2) 新桥面系吊装安装施工,新桥面系吊装安装施工过程和工艺类似于新建桥的程序。其具体技术要求如下: 1) 桥系各个组成部分都有较高的精度要求,各组件的预制加工与安装要符合设计的精度要求,可参照相关的技术规范。2) 主缆高强钢丝绳必须采用镀锌的才能确保其耐久性,并核对设计图纸提供的下料长度,精确截断下料长度,对各根钢丝绳进行必要的预拉,以消除非弹性变形。3) 桥面系桥面各点标高应尽量符合设计标高,一般需经反复的调整,主缆垂度与矢高比应符合设计要求。4) 钢件要求三级焊缝,焊接口周边必须密闭,以阻止雨水灌入。各杆就位后,应及时拼装,及时对焊主杆及系杆接头。对接焊缝按等强度连接施焊,系杆与主杆连接的焊脚尺寸 h_f 不小于系杆的厚度,采用满焊。油漆品种由建设单位确定,要求油漆采用二底二面工艺。5) 抗风索需尽量收紧才能保证桥功效。6) 其他方面技术操作。可参照交通部颁发的施工技术规范进行。

(3) 加固施工要点。施工时始终要严格遵守建设部颁《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)、《钢结构工程施工与验收规范》(GB 50205-95)、《建筑钢结构焊接规程》(JGJ 81-91)和交通部部颁《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041-2000)的规定施工外,对于混凝土尚应注意:A、加固施工所用的混凝土在浇筑前应进行配合比试验,以确保混凝土的各项指标满足设计要求;B、混凝土浇筑时,应根据现场情况采用附着式或插入式振捣器进行振捣。对于新旧混凝土结合面区域应特别注意振捣密实;C、混凝土初凝后,应立即进行养护。

(4) 防腐建议。主缆索夹夹持段仍采用旧桥的防腐方案,用油脂涂抹在主缆表面,并用防渗油薄膜包裹,最后外层套铝壳保护,经过20年的验证,该防腐措施是有效的。主缆的防腐最薄弱的地方为散索段的防腐,也是此桥更换主缆的真正原因,因此此段采用防腐性能较好的热缩带,在缠绕时采用50%的搭接缠绕,使索体外形成双层保护,同时在钢丝的表面涂抹一层较薄的油脂,以增强索体的防腐性能。吊杆索体外层套哈弗套管,内填充聚氨酯发泡剂,以保护索体具有良好的使用寿命。其余表面部份采用刷涂油漆防腐,因此仍存在着钢结构油漆防腐普遍存在的弱点,建议建设单位在每隔2~3年,应对桥梁的钢结构部分进行例行检查并做好钢结构的除锈防腐工作。

7 结语

钢丝绳索相比平行钢丝索体具有更好柔性与弹性,在施工中会产生更多的不利影响,如主缆的空缆线形的控制问题相比平行钢丝索体更复杂。本文从主缆、吊索、索夹和索鞍的设计进行分别介绍,并结合实桥的应用说明施工方法、步骤及注意事项。钢丝绳索在南平九峰索桥的成功应用,为今后类似桥梁设计和施工提供了参考。

参考文献

- [1] 徐君兰,姚玲森. 桥梁计算示例集吊桥[M]. 人民交通出版社, 1991: 12-24
- [2] 中交公路规划设计院. 公路悬索桥设计规范(报批稿)[S]. 北京,人民交通出版社, 2002
- [3] 蒋友宝,冯健,孟少平. 销接节点考虑接触特性的设计讨论[J]. 公路交通科技, 2006(9):76-80
- [4] 闻邦椿. 机械设计手册[K]. 北京:机械工业出版社, 2010: 1-164